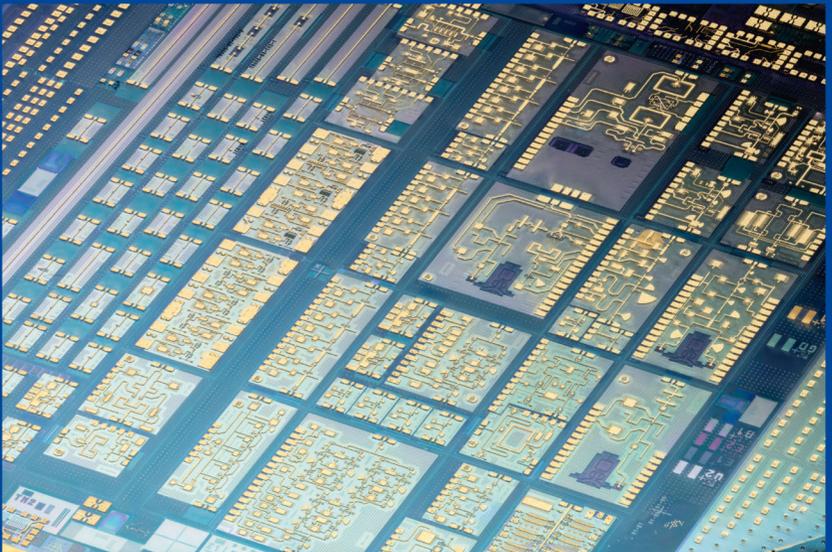


Forschungsberichte aus dem

Ferdinand-Braun-Institut,
Leibniz-Institut
für Höchstfrequenztechnik

Interconnection development for InP-HBT terahertz circuits









aus der Reihe:

Innovationen mit Mikrowellen und Licht

Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik

Band 58

Dimitri Stoppel

Interconnection development for InP-HBT terahertz circuits

Herausgeber: Prof. Dr. Günther Tränkle, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich

Ferdinand-Braun-Institut
Leibniz-Institut
für Höchstfrequenztechnik (FBH)
Gustav-Kirchhoff-Straße 4
12489 Berlin

Tel. +49.30.6392-2600
Fax +49.30.6392-2602

E-Mail fbh@fbh-berlin.de
Web www.fbh-berlin.de

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



Innovations with Microwaves and Light

Research Reports from the Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik

Preface of the Editors

Research-based ideas, developments, and concepts are the basis of scientific progress and competitiveness, expanding human knowledge and being expressed technologically as inventions. The resulting innovative products and services eventually find their way into public life.

Accordingly, the *“Research Reports from the Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik”* series compile the institute’s latest research and developments. We would like to make our results broadly accessible and to stimulate further discussions, not least to enable as many of our developments as possible to enhance everyday life.

This work investigates key aspects in indium phosphide process development, and the findings helped improving FBH’s transferred-substrate process. The developments in this work make it possible for the first time to build a fully functional millimeter-wave radar with integrated terahertz components. This opens new paths for complex high-frequency systems based on indium phosphide heterobipolar transistors, thus paving the way for future terahertz projects and applications.

We wish you an informative and inspiring reading

Prof. Dr. Günther Tränkle
Director

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich
Deputy Director

The Ferdinand-Braun-Institut

The Ferdinand-Braun-Institut researches electronic and optical components, modules and systems based on compound semiconductors. These devices are key enablers that address the needs of today’s society in fields like communications, energy, health and mobility. Specifically, FBH develops light sources from the visible to the ultra-violet spectral range: high-power diode lasers with excellent beam quality, UV light sources and hybrid laser systems. Applications range from medical technology, high-precision metrology and sensors to optical communications in space and integrated quantum technology. In the field of microwaves, FBH develops high-efficiency multi-functional power amplifiers and millimeter wave frontends targeting energy-efficient mobile communications as well as car safety systems. In addition, compact atmospheric microwave plasma sources that operate with economic low-voltage drivers are fabricated for use in a variety of applications, such as the treatment of skin diseases.

The FBH is a competence center for III-V compound semiconductors and has a strong international reputation. FBH competence covers the full range of capabilities, from design to fabrication to device characterization.

In close cooperation with industry, its research results lead to cutting-edge products. The institute also successfully turns innovative product ideas into spin-off companies. Thus, working in strategic partnerships with industry, FBH assures Germany’s technological excellence in microwave and optoelectronic research.



Interconnection development for InP-HBT terahertz circuits



Dimitri Stoppel

Von der Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik -
der Technischen Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften, Dr.-Ing.

Promotionsausschuss:

Gutachter: Prof. Dr. Günther Tränkle

Gutachter: Prof. Nils Weimann, Ph.D.

(University Duisburg-Essen)

Gutachter: Prof. Dr. habil. Wolfgang Heinrich

Juli 2019



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2020

Zugl.: (TU) Berlin, Univ., Diss., 2019

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2020

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2020

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-7204-9

eISBN 978-3-7369-6204-0



I would like to dedicate this thesis to my family and my friends, who supported me through the entire PhD period . . .





Declaration

I hereby declare that except where specific reference is made to the work of others, the contents of this dissertation are original and have not been submitted in whole or in part for consideration for any other degree or qualification in this, or any other university. This dissertation is my own work and contains nothing which is the outcome of work done in collaboration with others, except as specified in the text and Acknowledgments.

Dimitri Stoppel
Juli 2019





Acknowledgements

I would like to thank all people who help me to get to the point where I am now. First of all, I would like to thank Prof. G. Tränkle, who was also leading the FBH at the time of my stay for supervision my dissertation. The meetings with Prof. G. Tränkle were fruitful and always scientific and mentally supportive. Many thanks also to Prof. N. Weimann, who led the InP Devices and SciFab group. Prof. N. Weimann was for the whole period my first contact for daily advises, furthermore he was an impressive role model in all scientific concerns. Furthermore, I would like to thank the members of my working group, starting with Dr. M.I. Schukfeh, Dr. K. Nosaeva, Dr. S. Monayakul, Dr. S. Boppel, N. Volkmer, M. Brahem and Dr. N. Halder for the great support and the incredible atmosphere. Many thanks to the technicians of the FBH, who were supportive for all requests and problems in my experiments. In particular, I would like to thank S. Hochheim, D. Renter, N. Thiele, K. Kunkel, S. Breuer, A. Kuelberg, J. Behrchen, J. M. Koch, A. Runge, S. Schoenfeld, K. Ickert, M. Matalla, N. Sabelfeld for the daily help and support my work and the great team spirit. I also would like to thank the group leaders of the process technology department for the discussions and consultation, starting with Dr. P. Wolter, Dr. W. John, Dr. L. Weixelbaum, Dr. I. Ostermay, Dr. A. Thies, Dr. R.S. Unger and Dr. O. Krüger. Additionally, I like to thank Prof. W. Heinrich who is leading the microwave department of the FBH and Prof. V. Krozer, who is leading the terahertz department for the support. From both groups, I would like to thank the colleagues for the discussions, measurement, simulations and design support, beginning with Dr. M. Hrobak, Dr. M. Hossain, Dr. B. Janke, T. Shivan, A. Raemer and S. Schulz. Furthermore, I would like to gratefully acknowledge partial financial support under DLR project MIMIRAWE (50 RA 1327). Finally, thanks to my family, my girlfriend and my friends for mental support, distraction and inspiration during my work.





Zusammenfassung

Anwendungen bei Frequenzen über 300 GHz sind heutzutage noch im Forschungsstadium. Ein Grund für das Fehlen von Anwendungen ist das fehlende Angebot von kommerziell verfügbaren Systemen und Komponenten in dieser Frequenzregion. Ein vielversprechender Kandidat für Hochfrequenzkomponenten ist der Transfersubstrat-Prozess am Ferdinand-Braun-Institut (FBH) in Berlin. Dieser Prozess nutzt die sog. Substrattransfertechnologie (TS), um die monolithisch integrierten Hochfrequenzbauelemente (MMICs) auf ein beliebiges Trägersubstrat zu transferieren. Solche Trägersubstrate können zum einen passiv zur mechanischen und thermischen Unterstützung verwendet werden, als auch aktive vollprozessierte Bipolartransistor integrierte Schaltkreise beinhalten. Durch die Verbindung von hochkomplexen Bipolarschaltkreisen mit den hochfrequenten Indiumphosphid-Heterobipolartransistoren (InP HBTs) kann sowohl Komplexität als auch die Leistungsfähigkeit dreidimensional (3D) in einem platzsparenden Prozess integriert werden.

In dieser Dissertation wird der komplette InP TS Prozess Schritt für Schritt beschrieben. Während des Prozessüberblicks werden die drei Teile, Benzocyclobuten (BCB) Trockenätzen, Nickel-Chrom (NiCr) Widerstände und die through-silicon vias (TSV) / Siliziumdurchkontaktierungen aus dieser Arbeit in den InP Prozess eingeordnet.

3D integrierte MMICs, wie z.B. die InP HBTs, sind meist in einem hochfrequenztauglichen Material eingebettet. Das meistverwendete Material zur Planarisierung und zum Verbinden vom InP- und Träger-Substrat ist BCB. In dieser Dissertation wird die Entwicklung eines induktiv gekoppelten Plasmaätzprozesses beschrieben (ICP). Der entwickelte Prozess führte zu einer Verfünfachung der Ätzrate von 60 nm/min auf 300 nm/min bei gleichbleibender Anisotropie und Bias-Spannung. Während der Untersuchungen wurde eine parasitäre Seitenwandabscheidung, bestehend aus AlF_xO_y entdeckt. Die Grundursache für diese Abscheidung konnte auf die Kopplungsplatte, bestehend aus Al_2O_3 , zur Induktivantenne des Plasmaätzers zurückgeführt werden. Mittels eines Tetramethylammoniumhydroxid (TMAH) basierenden Entwicklers konnte die Seitenwandabscheidung selektiv entfernt werden, ohne dem MMIC Aufbau zu schaden. Eine Variation der Substratträgermaterialien zeigte einen Einfluss auf die Ätzrate und die Form der Seitenwandabscheidung, wobei eine komplette Unterdrückung nicht erreicht werden konnte. Als Ausblick für kommende Weiterentwicklungen im Bere-

ich des Trockenätzens wird zum Schluss noch eine Methode mit einem Faradaykäfig zur Unterdrückung der parasitären Seitenwandabscheidung motiviert.

Für komplexe Schaltkreistopologien in Hochfrequenzanwendungen sind resistive passive Elemente unabdingbar. In dieser Dissertation wurden drei unterschiedliche Technologiekonzepte zur Herstellung der NiCr Widerstände untersucht. Es wurde ein sehr geringer Kontaktwiderstand mit $8 \times 10^{-10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ zwischen NiCr und dem Kontaktmetall erreicht. Es zeigte sich, dass sich mit der Anbindung des resistiven Materials von unten zum Kontaktmetall und einer Strukturierung mittels lift-off, die besten Ergebnisse erzielen lassen. Die Kontaktierung von oben mit einer nasschemischen Strukturierung (Cr-etch18) des NiCr, erzielt verhältnismäßig hohe Kontaktwiderstände mit $2.61 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$, die auf eine mögliche Re-Oxidation des NiCr zurückgeführt werden können. Eine massive Unterätzung des NiCr unter einer Siliziumnitrid (SiNx) Schicht konnte bei der Strukturierung des NiCr mittels Nassätzen und einer Bodenkontaktierung beobachtet werden. Dieser Effekt konnte mit dem elektrochemischen Potenzial während des Nassätzens zwischen edlen und unedlen Metallen erklärt werden. Thermische Simulationen und Stresstests konnten eine Widerstandstemperatur während des Gleichstrombetriebs von $T \geq 300 \text{ }^\circ\text{C}$ aufzeigen. Das Technologiekonzept mit den besten Ergebnissen wurde in mehreren MMIC-Prozessen als resistives Bauelement, mit einem Schichtwiderstand von $25 \Omega/\square$, integriert. Hochfrequenzsimulationen- und Messungen zeigten eine Übereinstimmung der Ergebnisse mit einem Reflexionskoeffizienten von unter 30 dB in einer Frequenzbandbreite von 10 MHz bis 220 GHz. Die Nutzbarkeit der NiCr Widerstände in Schaltkreisen konnte mittels eines Wanderwellenverstärkers (TWA) mit einer Verstärkung von 12 dB bei 95 GHz nachgewiesen werden.

Der Aufbau von Hochfrequenzkomponenten zu einem System erfordert besondere Maßnahmen, um ungewollte parasitäre Moden während des Betriebs zu vermeiden. Im InP Prozess wurden zur Unterdrückung dieser Moden TSVs im Siliziumträgersubstrat integriert. Das Bohren der Löcher, mit einer Tiefe von $200 \mu\text{m}$ wurde mittels eines ultravioletten (UV) Lasers realisiert. Nach dem Bohren wurden die Löcher mittels eines Hochdruckwasserstrahls mit 20 MPa Druck gereinigt und anschließend mit einem Grundmetall bestehend aus 100 nm Titan und 200 nm Gold versehen. Anschließend wurden die Löcher elektrochemisch mit $10 \mu\text{m}$ Gold aufgefüllt und mit BCB planarisiert. Die Planarisierung der hoch anspruchsvollen Aspektverhältnisse konnte durch einen vorhergehenden Einweichprozess mittels Mesitylen, erreicht werden. Das überstehende BCB wurde bis zum Silizium mittels Plasmaätzen abgetragen und anschließend mechanisch poliert. Zur Kontaktierung der galvanisierten Seitenwand wurde noch eine Metalldecke mittels lift-off auf die TSVs aufgebracht. Am Ende des InP HBT Prozesses wurde das Substrat auf eine Zieldicke von $700 \mu\text{m}$ auf $127 \mu\text{m}$ abgedünnt. Es konnten flächendeckend TSV Durchgangswiderstände von circa 0.3Ω gemessen werden.



Gleichstrom und Hochfrequenzmessungen auf WaferEbende konnten keine negative Beeinflussung der Schaltkreise mit integrierten TSVs nachweisen. Die finalen Substrate wurden vereinzelt und anschließend in einen Radar-Demonstrator integriert.